

Analyse de l'influence du creusement d'un tunnel au sein d'un versant instable subissant un mouvement gravitaire profond.

Lionel Causse (lionel.causse@mines-paristech.fr); Roger Cojean (roger.cojean@mines-paristech.fr)

Jean-Alain Fleurisson (jean-alain.fleurisson@mines-paristech.fr)

Centre de Géosciences – Mines ParisTech – 35 rue Saint Honoré, 77305 Fontainebleau, France

RESUME : Les rétro-analyses de tunnels anciens en contexte de versants instables ont conduit à considérer différentes situations de tunnels entrant dans un versant : tunnel transversal au versant, tunnel oblique par rapport à celui-ci, ou tunnel longeant le versant sous une faible couverture. Les pathologies identifiées dans la structure des ouvrages varient en fonction de ces situations. Cette recherche s'intéresse aux différents mécanismes d'instabilités de versant, particulièrement aux processus de fluage ainsi qu'aux désordres affectant la structure de tunnels traversant ces versants en les longeant. L'analyse de la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG) de ces ouvrages en situation de versant est un point important de cette recherche.

Au travers de simulations numériques, différents processus relatifs au vieillissement et à l'endommagement des structures des ouvrages ont été pris en compte. Il est possible de distinguer d'une part les facteurs associés aux conditions géologiques et géomorphologiques du versant et leurs évolutions dans le temps et d'autre part les facteurs correspondant aux méthodes de creusement et de construction du tunnel. L'influence des premiers facteurs sur la cinétique des mouvements et l'apparition des pathologies de l'ouvrage peut être mise en évidence en étudiant différents contextes géologiques, géomorphologiques, hydrogéologiques et sismiques. Cette étude s'intéresse à l'influence du fluage au sein du terrain encaissant comme critère aggravant les pathologies de l'ouvrage.

Le creusement d'un tunnel favorise la déstabilisation du versant en provoquant un déconfinement plus ou moins important du massif encaissant suivant sa nature. Le fluage entraîne une augmentation des contraintes dans la structure et la convergence des parements au cours du temps. Au sein d'un versant, sujet au fluage et avec un tunnel proche de la surface, l'influence du fluage est mise en évidence par rapport à un modèle de base ne prenant pas en compte ce phénomène. Le fluage est un des moteurs de la déstabilisation du versant, conduisant à la localisation de bandes de cisaillement. Par ailleurs, il influence le développement de pathologies dans la structure de l'ouvrage.

En conclusion, des enseignements sur les méthodologies d'analyse de ces ouvrages et leur surveillance sont tirés.

1 INTRODUCTION

L'évolution géomorphologique des versants montagneux durant la période Quaternaire conduit dans certains cas à une instabilité sous l'influence de moteurs multiples, agissant de manière seule, simultanée ou successivement et ayant une influence relative plus ou moins grande. Quelques uns des principaux facteurs d'influence associés aux conditions géologiques et géomorphologiques du versant et leurs évolutions dans le temps sont cités ci-dessous :

- le rééquilibrage du profil d'équilibre d'une rivière en pied de versant ;
- le comportement par à coups des déplacements et déformations du versant sous l'influence de précipitations saisonnières ;
- la décompression du versant dans son histoire post-glaciaire associée au comportement différé du massif.

Ce dernier facteur retraçant l'évolution l'histoire post-glaciaire du versant ainsi que le comportement différé constitue la base de cette étude. En se basant sur une série de simulations numériques (FLAC 2D) d'un versant soumis à des déformations gravitaires profondes corrélées avec une étude de cas et des observations de terrain (Apuani et al. 2007), notre approche vise à étudier l'influence de la construction d'un tunnel au sein du versant.

L'interaction d'un tunnel avec un versant instable a été étudiée par plusieurs auteurs, lesquels ont mis en plusieurs critères d'influence en évidence :

- plus un tunnel est proche de la surface du versant et plus la stabilité du versant est critique (Ahmadi et al. 2010) ;

- la position du tunnel en pied du versant conduit à une déstabilisation du versant plus importante avec des déplacements horizontaux similaires à ceux du versant sans tunnel comparé à des situations de tunnel au centre ou en tête du versant (Date et al. 2010) ;
- au niveau de la distance d'interaction du tunnel avec la surface de rupture du versant, une distance inférieure à 1,5 diamètre de l'ouvrage tend à augmenter fortement l'interaction de l'ouvrage avec le versant (Date et al. 2010).

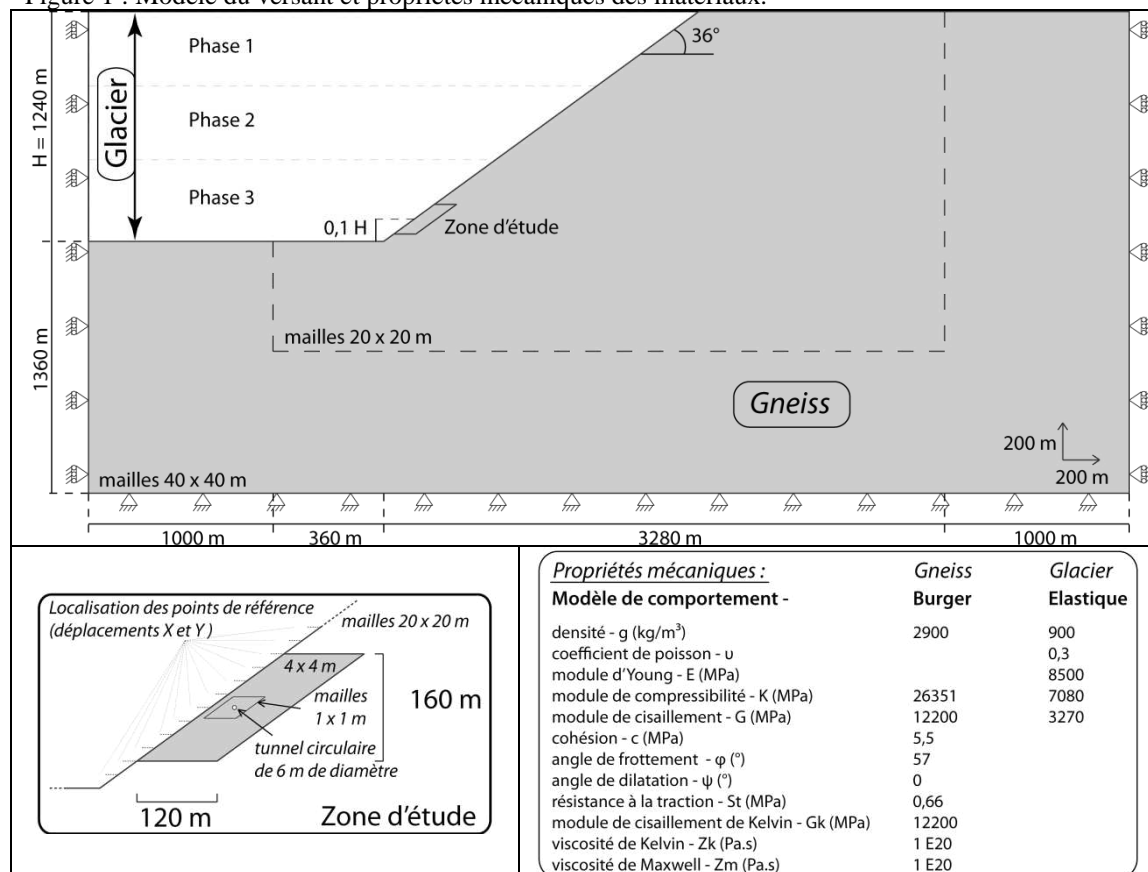
2 MODELE NUMERIQUE

2.1 Cadre des simulations numériques

Dans le cadre de notre étude, le choix d'implantation du tunnel au sein du versant en pied de versant à une distance de 1,5 diamètre de la surface du versant est considéré comme une des situations les plus préjudiciables pour la stabilité du versant. L'excavation du tunnel de 6 m de diamètre est effectuée avec l'hypothèse d'une vitesse d'avancement de 5 mètres par jours et en tenant compte du déconfinement progressif du massif autour de l'ouvrage méthode « convergence-confinement » (Guenot et al. 1987). Le déconfinement se poursuit sur une durée de 12 jours soit 60 mètres ($\lambda \approx 99,9\%$).

Le modèle du versant (Figure 1) est basé sur les différentes phases de l'étude (Apuani et al. 2007) accompagnées par une zone raffinée en pied de versant afin de permettre la mise en place d'un tunnel.

Figure 1 : Modèle du versant et propriétés mécaniques des matériaux.



Le comportement mécanique du massif est simulé grâce à un modèle de comportement tenant compte des déformations et déplacements différés dans le temps. Le modèle Elasto-visco-plastique de Burger a été choisi afin de mettre en évidence l'évolution du versant sous l'influence d'un phénomène de fluage et associé au retrait glaciaire ainsi qu'à la mise en place d'un tunnel au sein du massif.

2.2 Phases des simulations numériques

Le modèle reprend les bases de l'étude numérique du versant (Apuani et al. 2007) :

- 1- l'équilibre élastique du système est recherché avec la charge maximale du glacier. Les limites du modèle et les conditions initiales (gravité) sont implantées ;

- 2- les paramètres mécaniques du massif constitué de gneiss et du glacier sont attribués ;
- 3- le versant se décomprime sous l'effet de la fonte du glacier en 3 phases successives instantanées, sur une période totale de 1500 ans. Les résultats sont obtenus en condition sèche (absence de nappe phréatique).

Cette phase correspond à la fin de la simulation numérique réalisée pour l'étude de stabilité du versant. Les résultats à cette étape montrent que le versant ne présente pas d'instabilité profonde. Les phases suivantes visent à appréhender l'impact du creusement d'un tunnel dans le versant.

- 4- L'excavation du tunnel circulaire de 6 m de diamètre est réalisée en posant l'hypothèse d'une vitesse d'avancement de 5 mètres par jours (traditionnel). Les contraintes en paroi de l'excavation sont relâchées progressivement en accord avec la méthode « convergence-confinement » (Guenot et al. 1987). Le processus de déconfinement se poursuit sur une durée totale de 12 jours, au cours de laquelle aucune structure de soutènement n'est mise en place. Cette phase permet de déterminer l'influence du déconfinement mécanique sur la déstabilisation du versant ;
- 5- au bout de 25 jours, un revêtement en béton d'une épaisseur de 0,7 mètres, est mis en place et est caractérisé par les propriétés suivantes (cas a) :

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques de la structure du tunnel.

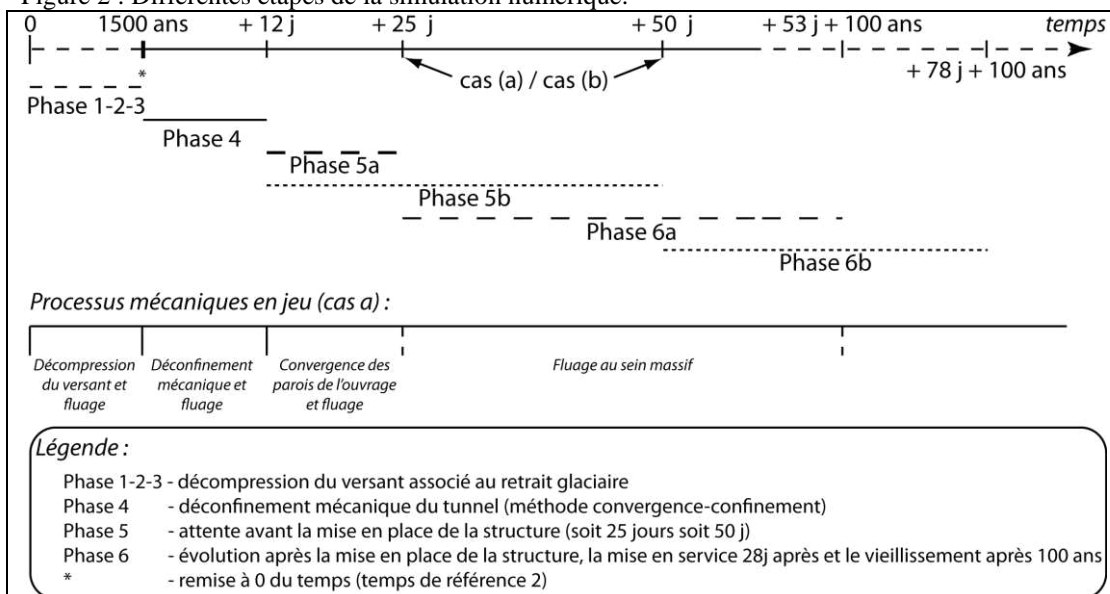
Module Elastique E (MPa)	Moment d'inertie I (m ⁴)	Aire de la section (m ²)	Epaisseur (m)	Coefficient de poisson v
44,8 E ³	1,8583 E ⁻²	0,7	0,7	0,2

L'influence du moment d'attente avant la mise en place de la structure est étudiée en comparant le (cas a) avec une mise en place de la structure au bout de 50 jours (cas b).

Dans les 2 cas, cette étape vise à caractériser l'impact de l'attente dans le processus de creusement de l'ouvrage ;

- 6- l'étude à long terme de l'ouvrage dans le versant est considérée au bout de 100 ans à partir du moment de l'ouverture de la mise en service de l'ouvrage, soit 28 jours après la mise en place de la structure.

Figure 2 : Différentes étapes de la simulation numérique.



3 RESULTATS

3.1 Critères d'interprétation

L'influence de la mise en place d'un tunnel en base du versant est étudiée en termes de déplacements au niveau de la surface du versant (Figure 1). De plus l'influence relative des différentes phases de la

construction de l'ouvrage (phases 4 à 6) est étudiée en termes de part des différents processus sur le mouvement global au niveau du gonflement en pied du versant.

3.2 Premiers résultats

Au niveau des vecteurs déplacements en base du versant, la mise en place d'un tunnel à proximité de la surface entraîne de faibles évolutions de la déformation de la surface du versant. On peut remarquer qu'au bout de 100 ans après l'entrée en service de l'ouvrage, les vecteurs déplacements, légèrement plus importants restent faibles comparés aux déplacements provoqués par la fonte du glacier.

Tableau 2 : Vecteurs déplacements des différentes phases.

Altitude (m)	1380	1400	1420	1440	1460	1480	1500	1520	1540	1560	1580	1600
Phase 1 – 2 – 3	1.360	1.380	1.398	1.406	1.424	1.492	1.508	1.428	1.409	1.405	1.399	1.392
Phase 4	1.365	1.387	1.405	1.415	1.433	1.503	1.519	1.438	1.419	1.415	1.408	1.401
Phase 5 – cas a	1.366	1.387	1.405	1.415	1.433	1.504	1.519	1.439	1.419	1.415	1.409	1.401
Phase 6 – cas a	1.422	1.444	1.463	1.473	1.491	1.561	1.576	1.496	1.478	1.475	1.469	1.462
Phase 5 – cas b	1.366	1.387	1.405	1.415	1.433	1.504	1.519	1.439	1.419	1.415	1.409	1.401
Phase 6 – cas b	1.422	1.445	1.463	1.473	1.492	1.562	1.576	1.496	1.478	1.475	1.469	1.462

Le tableau 2, ci-dessous permet de quantifier au niveau des différentes altitudes la part des déplacements des différentes phases. Au niveau des altitudes 1480 m et 1500 m, respectivement à la même altitude que le centre de l'ouvrage et pratiquement à l'aplomb de l'ouvrage, la part des vecteurs déplacements, dus au déconfinement autour de l'excavation du tunnel (phase 4), en surface du versant sont légèrement supérieures.

Il est possible d'en conclure que la mise en place de l'ouvrage et le déconfinement du massif associés au creusement affaiblissent légèrement la stabilité du versant en augmentant les déplacements au voisinage proche du versant.

Une attente plus longue avant la mise en place de la structure (cas b plutôt que le cas a) aura tendance à augmenter légèrement les déplacements pendant la phase d'attente et donc la part des déplacements de cette phase (phase 5).

La comparaison de la part des déplacements de l'évolution dans le temps de l'ouvrage dans le versant (phase 6) entre le cas (a) et le cas (b) permet de noter une légère augmentation lorsque l'attente avant la mise en place de la structure augmente (cas b). Cette observation semble indiquer que bien que cette phase 6 soit d'une durée équivalente et soumise au seul processus de fluage pour les cas (a) et (b), une attente plus importante durant la phase 5 (cas b) diminuera la stabilité générale et accélérera les déplacements à long terme.

Tableau 3 : Part des différentes phases dans les déplacements en base du versant.

Altitude (m)	1380	1400	1420	1440	1460	1480	1500	1520	1540	1560	1580	1600
Phase 1 – 2 – 3	95.64	95.57	95.53	95.48	95.47	95.58	95.68	95.49	95.34	95.29	95.26	95.23
Phase 4	0.40	0.45	0.50	0.55	0.61	0.69	0.68	0.65	0.65	0.64	0.62	0.61
Phase 5 – cas a	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Phase 6 – cas a	3.95	3.96	3.95	3.94	3.90	3.70	3.60	3.83	3.98	4.05	4.09	4.14
Phase 5 – cas b	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03
Phase 6 – cas b	3.96	3.98	3.97	3.96	3.92	3.72	3.62	3.84	3.99	4.05	4.10	4.14

L'étude de l'influence des différentes phases sur l'évolution des déplacements au niveau de la surface du versant, rapportée à la durée des processus (en année) a permis de mettre en évidence plusieurs points :

- L'influence de la phase de déconfinement mécanique en tenant compte du temps relativement court de cette phase est la plus significative. Elle est suivie d'un à deux ordres de grandeur par la phase d'attente avant la mise en place de la structure, de 3 ordres de grandeur par la phase de décompression du versant associée au retrait glaciaire et enfin de 3 ordres de grandeur par la phase d'évolution de l'ouvrage dans le versant.

- Au niveau des vecteurs déplacements, l'impact du creusement du tunnel en fonction du temps a permis de souligner l'impact du creusement à 12 jours, 25 jours ou 50 jours après le début du creusement de manière plus significative au niveau de la surface du versant (altitudes de 1480 m et de 1500 m).
- Le temps d'attente avant la pose de la structure est sujette au seul processus de fluage. Il est normal que la phase d'attente (25 jours ou 50 jours – phase 5) soit moins influente dans le cas (b) par rapport au cas (a) moins longue.

Tableau 4 : Influence des différentes phases dans l'évolution des déplacements en base du versant en fonction du temps.

Altitude (m)		1380	1400	1420	1440	1460	1480	1500	1520	1540	1560	1580	1600
Phase 1–2 –3		9.06 E-04	9.20 E-04	9.32 E-04	9.38 E-04	9.49 E-04	9.95 E-04	1.01 E-03	9.52 E-04	9.39 E-04	9.37 E-04	9.33 E-04	9.28 E-04
Phase 4	Influence des différentes phases en fonction du temps	1.74 E-01	1.98 E-01	2.22 E-01	2.48 E-01	2.76 E-01	3.28 E-01	3.27 E-01	2.96 E-01	2.91 E-01	2.86 E-01	2.77 E-01	2.70 E-01
Phase 5–cas a		5.19 E-03	6.21 E-03	7.40 E-03	8.78 E-03	1.08 E-02	1.40 E-02	1.48 E-02	1.33 E-02	1.26 E-02	1.21 E-02	1.12 E-02	1.05 E-02
Phase 6–cas a		5.61 E-04	5.72 E-04	5.78 E-04	5.80 E-04	5.81 E-04	5.77 E-04	5.67 E-04	5.73 E-04	5.88 E-04	5.96 E-04	6.01 E-04	6.04 E-04
Phase 5–cas b		2.31 E-03	2.68 E-03	3.09 E-03	3.61 E-03	4.51 E-03	5.67 E-03	5.88 E-03	5.63 E-03	5.50 E-03	5.24 E-03	4.82 E-03	4.48 E-03
Phase 6–cas b		5.63 E-04	5.74 E-04	5.80 E-04	5.83 E-04	5.84 E-04	5.80 E-04	5.70 E-04	5.74 E-04	5.89 E-04	5.97 E-04	6.02 E-04	6.05 E-04

L'interprétation des processus, les plus significatifs sur l'évolution des mouvements au sein du versant a permis de classer les différentes phases suivant leurs influence relative en fonction du temps :

- la phase de déconfinement (phase 4) caractérisant le processus de déconfinement mécanique autour de l'excavation du tunnel est la plus significative. Durant ce processus, le fluage du massif a également lieu mais son influence est moins significative ;
- la phase d'attente avant la mise en place de la structure (phase 5) décrit le processus de convergence des parois en absence de revêtement ainsi que le fluage dont l'impact est considéré comme moins significatif ;
- le retrait glaciaire (phases 1 – 2 – 3) met en évidence la décompression successive du versant ainsi que le processus de fluage augmentant au fur et à mesure de son évolution ;
- l'évolution des déplacements en base du versant sollicité par un mouvement lent de fluage ainsi que par la construction d'un tunnel (phase 6) souligne le processus de fluage.

4 CONCLUSIONS

L'étude de l'impact du creusement d'un tunnel dans un versant sujet à une instabilité gravitaire profonde (DSGSD) a été réalisée au moyen de simulations numériques. L'évolution des déplacements en base du versant a été considérée pendant et après le retrait glaciaire ainsi que durant les différentes phases de construction et d'utilisation de l'ouvrage.

Les résultats de ce travail suggèrent :

- L'importance des mouvements à la surface du versant sont le résultat principalement de la décompression du versant associé au retrait glaciaire ($> 95 \%$). L'évolution du versant après le creusement de l'ouvrage reste faible ($3,5 \% < d < 4,0 \%$). La faible influence des différentes phases de construction de l'ouvrage sur les mouvements du versant souligne la stabilité du système versant/ouvrage. La mise en place d'une nappe de versant, de zone mylonitique associée à des accidents, sont susceptibles de diminuer la stabilité du versant et par la même occasion la part des différentes phases de creusement.
- La phase de déconfinement mécanique (phase 4) reste la phase de construction de l'ouvrage provoquant relativement à sa courte durée (12 jours) le maximum de déplacements du versant. L'attente avant la mise en place de la structure (phase 5) est légèrement moins significative. En d'autres termes, les phases présentant des processus multiples et significatifs sont importantes dans la prise en compte des mouvements de versants.

REFERENCES

- Apuani, T., Masetti, M., Rossi, M., 2007. Stress-strain-time numerical modelling of a deep-seated gravitational slope deformation: Preliminary results. *Quaternary international* 171-172, pp. 80 - 89.
- Ashtiani, M. & Palassi, M., Ahmadi, A., 2010. Effect of excavation of tunnels in the convex slopes using distinct element method. *Rock mechanics in civil and environmental engineering*, pp. 391 - 394.
- Athanasopoulos, S.D., Nomikos, P.P., Sofianos, A.I., 2012. Burgers rock creep around axisymmetric tunnels. *Harmonising rock engineering and the environment*, pp. 163 – 168.
- Ceccucci, M., Maranto, G., Mastroviti, G., 2008. The Serre La Voute Landslide (North-West Italy): Results from ten years of monitoring. *Landslides engineered slopes*, pp. 1111 - 1117.
- Huang K.P., Wang T.T., Huang T.H., Jeng F.S., 2010. Profile deformation of a circular tunnel induced by ambient stress changes. *Tunneling and underground space technology*, pp. 266 - 278.
- ITASCA, 2005. FLAC 5.0 User's Manual.
- He, W., Wu, Z., Kojima, Y., Asakura T., 2009. Failure mechanism of deformed concrete tunnels subject to diagonally concentrated loads. *Computer-aided civil and infrastructure engineering* 24, pp. 416 - 431.
- Koizumi, Y., Lee, J., Date, K., Yokota, Y. & Yamamoto, T., Fujisawa, K., 2010. Numerical analysis of landslide behavior induced by tunnel excavation. *Rock mechanics in civil and environment engineering*, pp. 555 - 558.
- Sulem, J., Panet, M., Guenot, A., 1987. An analytical solution for time-dependent displacements in a circular tunnel. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* 24, pp. 155 – 164.
- Wang, T.T., 2010. Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes. *Engineering geology* 115, pp. 80 - 95.